

近40年来天山东段冰川变化及其对气候的响应^①

王叶堂, 侯书贵, 鲁安新, 刘亚平

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用经1959/1961年航片校正的地形图、1972年航片和1992年TM、2001年ETM+遥感影像,通过遥感图像处理 and 人工目视解译,分析了天山东段哈尔里克山区1959/1961—2001年的冰川变化。结果表明,1959/1961—2001年冰川面积和储量减少量分别占1959/1961年的11.4%和12.3%。其中,20世纪50年代末到70年代初,冰川退缩幅度大,冰川面积和储量年减少率分别约为0.51%和0.508%,20世纪70年代初到90年代初,退缩大幅减缓,冰川面积和储量年减少率为0.1%和0.13%,90年代以后退缩速度又有加剧趋势,冰川面积和储量年减少率增加到0.31%和0.34%。对流域气象站气候资料分析发现,1959/1961—1972年的冰川面积减少率大,主要与1959—1966年时段气温偏高、而降水偏少有关。升温幅度的增大是影响20世纪90年代初以来研究区冰川退缩加剧的根本原因。

关键词: 哈尔里克山; 冰川变化; 遥感; 地理信息系统

中图分类号: P343.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-6060(2008)06-0813-09(813~821)

冰川是自然界重要而且极具潜力的淡水资源,它覆盖了地球10%的陆地面积,而且世界上有80%的淡水在冰川上储存。作为我国西部特有的自然景观,冰川对于干旱区自然生态环境演变、绿洲农业和社会经济文明发展有着举足轻重的地位。冰川素有“高山固体水库”之称,具有调节河川径流的作用。它可拦截和凝结外来水汽,增加局地降水,不仅是干旱区绿洲景观及其相关的水文和生态系统稳定和持续存在的“捍卫者”^[1],更是我国西部干旱区水资源的重要组成部分。冰川是气候的产物,又是全球气候变化灵敏的指示器,对气候变暖高度敏感。而且,在气候变化中,干旱或半干旱地区的水文因子对气候变化的敏感性要远大于湿润区^[2]。在全球变暖的大背景下,自小冰期以来,特别是20世纪50年代以来,我国西部大部分地区冰川呈退缩趋势,天山中段^[3]、乌鲁木齐河源^[4]、格拉丹冬地区^[5]、祁连山区^[6]、昆仑山区^[7]等等都出现了不同程度的冰川退

缩现象,但是由于受制于区域气候变化,冰川退缩区域差异明显,对区域可持续发展的影响也不同。此外,大范围的冰川退缩使得河川径流量增加,长期来看,这种影响很可能会使得河川径流减少。但这是基于常理的推测,各地具体情况如何还需要实测数据验证。预计本世纪全球持续变暖,升温可能达到1.4~5.8℃^[8],冰川将会继续退缩,这势必对我国西部干旱地区尤其极干旱的新疆东部哈密地区可持续发展带来深远的影响。因此,精确监测过去相关工作力度不够且亟待研究的新疆东部哈尔里克山冰川变化及其区域气候变化的响应,对提高天山冰川变化的认识和为今后哈密地区的水资源变化分析、社会经济发展规划的制定具有重要的意义。由于高海拔山区自然条件恶劣,受自然和物质因素的限制,实施全方位的冰川调查是个难题,同样,冰川变化的常规观测方法受多方面的因素限制,在很多山区也无法实施,这使得冰川过去变化的信息很难得到。

① 收稿日期: 2007-12-10; 修订日期: 2008-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(90411003和40121101); 中科院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-344); 中科院百人计划项目共同资助

作者简介: 王叶堂(1979-),男,博士生,从事遥感与地理信息系统在冰冻圈中的应用研究。E-mail: wangyetao@163.com

通讯作者: 侯书贵(1970-),男,研究员,从事冰川现代化过程与冰芯记录研究。E-mail: shngui@126.ac.cn

随着 3S 技术的发展和普及,为冰川变化研究提供了有效的手段^[9],特别是近几年来高分辨率(空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率)遥感卫星的发展为实时、动态、精确的监测冰川变化提供了强有力的技术支持。本文采用遥感与 GIS 技术,利用 Landsat TM、ETM+ 遥感影像、航片,并结合经航片校对的 1:1 000 000 地形图,分析了天山最东段哈尔里克山区最近 40 多年的冰川变化情况,并结合气象观测数据探讨了其对气候变化的响应。

1 研究区概况

哈尔里克山位于天山山脉的最东端(图 1),沿北北西—南南东走向延伸,平均海拔 4 000 m 左右,最高峰托木尔提峰海拔 4 886 m。由于处在影响本区主要的冷湿气流的通道山,本区因而得以发育冰川,再往东数百公里之内没有冰川存在,这是一个很独特的冰川区。根据中国冰川编目资料^[10],本区包括大白杨沟(5Y711A)、科托果勒(5Y711B)、吐尔干(5Y711C)、板房沟(5Y822A)、榆树沟(5Y822B)、庙儿沟(5Y822C)、克尔其马克(5Y822D)、乌拉台沟

(5Y822E)和大天生圈沟(5Y822F)9 个分流域,共有冰川 122 条,总面积为 125.89 km²。冰川面积相对较小,最大的冰川面积只有 6.59 km²,而且小于 1 km² 的冰川数量所占比例为 68.9%,平均雪线高度在 3 970~4 050 m 之间。西风气流、西北气流和北方气流是影响该区的主要气流^[10]。西风气流是主要的水汽携带者,运行于海拔 5 000 m 高空,夏半年给本区带来较多的降水,蒙古—西伯利亚气流多在冬季侵入本区,带来更低的气温。根据哈密气象站资料,600 hPa 高度上的年平均气温为 -9℃,夏季 6~8 月的平均气温为 -0.9℃^[10]。地处亚洲大陆腹地,远离海洋,气候极端干旱,山麓地带年降水量南坡不足 100 mm,北坡也不超过 200 mm,但是随着海拔升高,降水明显增多,海拔 4 000 m 以上的区域年降水量可达 400~500 mm^[11]。夏季主要受西风气流的影响,降水量集中在 5~9 月,这一时期降水量占全年降水量 79.6%^[11],冬季天气系统受蒙古高压的控制,空气寒冷干燥,降水很少,位于哈尔里克山北坡的伊吾气象站观测资料表明,降水量仅占全年的 8%^[12]。

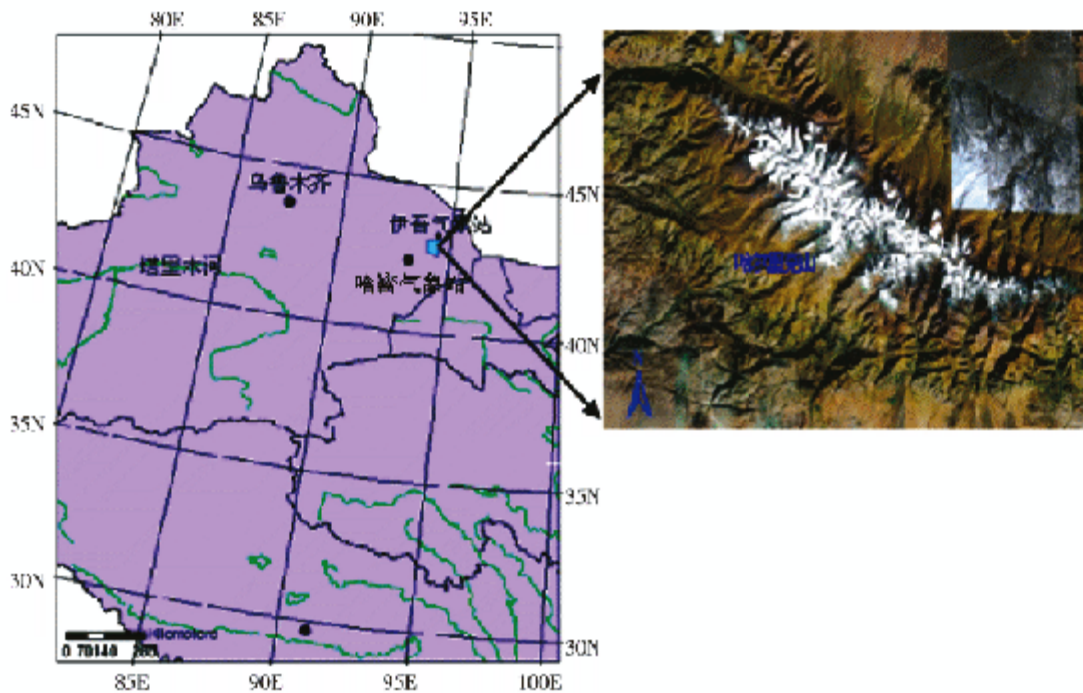


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the study region

2 数据与处理方法

本研究采用的数据主要是 1959/1961 年 6、7 月拍摄的航片,由此完成的 1:100 000 地形图;1972 年 7 月拍摄的 1:40 000 航片;1992 年 8 月 15 日的 Landsat TM 卫星遥感影像(分辨率 28.5 m);2001 年 9 月 17 日的 Landsat ETM+ 数字遥感影像(融合后的分辨率 14.25 m);以及该研究区的 1:50 000 地形图生成的数字高程模型。

冰雪在可见光及近红外波段(TM1~TM4)反射率高,但冰川的光谱值范围较宽,不利于与背景及其它地物区别,而冰川在 TM5 光谱值范围很窄,是冰川信息提取的有利波段。特别是由于水在中远红外的强烈吸收效应,使冰雪在 TM5 波段光谱值急剧降低,且明显低于冰川中冰碛的光谱亮度值^[13]。因此,在处理 TM 和 ETM+ 影像采用了 TM 和 ETM+5、4、3 通道做假彩色合成处理,以便于冰川边界的提取。

首先用高精度扫描仪对地形图进行扫描,并对地形图进行几何纠正,几何纠正的均方根误差小于一个象元,为了便于不同时期的图像比较,必须进行几何精纠正和坐标归一化处理,以实现图像与图像、图像与地形图的配准。以几何纠正后的地形图为底图,在遥感影像和地形图上均可明显识别地物点为地面控制点对 1972 年航片、1992 年的 TM 影像和 2001 年的 ETM+ 影像进行配准,处理时并采用 WGS-84 椭球体和 Albers 等面积圆锥投影变化成统一的投影系统,最大配准误差小于 1 个象元。地形因素会导致太阳入射角和高度角的变化,产生地形阴影,影响冰川分类的精度。利用该区的数字高程模型对遥感影像进行了地形纠正处理,明显提高了冰川分类信息的准确度。ETM+ 图像的获取时间是 2001 年 9 月份,此时高山积雪消融已基本结束,新降雪可能形成季节性雪斑。依据冰川运动会留下特殊的纹理,而雪斑不具备这种特征,对配准后的遥感图像进行了锐化增强处理,这样可以更有效的区分雪斑和有冰雪覆盖的冰川。具体处理流程如图 2。

1959/1961 年的冰川范围由地形图直接数字化

而得到,为了提高遥感影像提取冰川信息的自动化程度,采用了比值法和阈值法对遥感影像进行分类尝试,但是受积雪的影响,结果不甚理想。尽管人工目视解译费时耗力,但是到目前为止仍是冰川尤其小冰川占大多数的冰川边界解译精度最高的方法^[14],1972、1992 年和 2001 年的冰川范围人工目视解译获得。为了提高冰川边界提取精度,手工勾绘时误差控制在一个象元。在软件 ArcGIS9.0 支持下,进行冰川边界矢量化处理,生成四期冰川边界的矢量图层。利用 GIS 的空间分析功能,分别计算上述各期的冰川面积,对各期的冰川分布进行空间叠加,计算冰川变化结果。由于受 1959/1961 年航测范围的限制,本文只对 94°00′~94°30′E 和 42°50′~43°15′N 范围内的冰川做研究,根据 1986 年出版的中国冰川编目资料,该范围内冰川 94 条,占哈尔里克山区冰川总面积的 79.7%,能够反应山区冰川变化情况。

遥感影像的空间分辨率与均方根误差都影响到测量的准确性,据 Hall^[15]、Silvrio^[16] 等计算冰川长度和面积变化不确定性的公式:

$$\text{长度不确定性} = [\text{影像 1 的空间分辨率}^2 + \text{影像 2 的空间分辨率}^2]^{1/2} + \text{配准误差}, (1)$$

$$\text{面积不确定性} = \text{影像的空间分辨率}^2 \times (2 \times \text{长度不确定性} / \text{影像的空间分辨率}), (2)$$

计算得到研究区冰川面积最大误差为 0.005 6 km²。

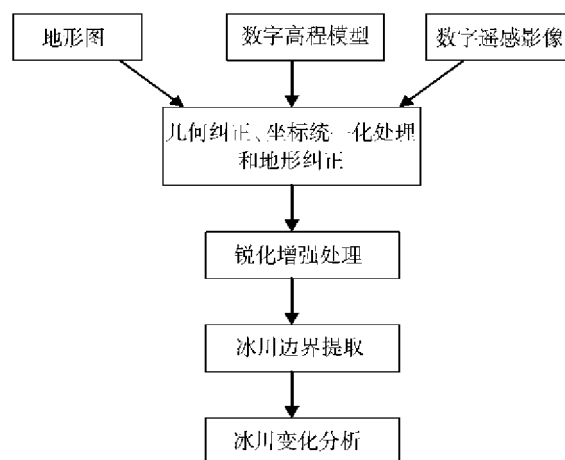


图 2 数据处理流程

Fig. 2 Flowchart of data processing

3 结 果

根据上述资料和方法,对研究区 1959/1961 年、1972 年、1992 年和 2001 年 4 个时段的冰川范围和进退变化情况进行了分析,结果(表 1)表明该研究区冰川呈萎缩状态,从 1959/1961 到 2001 年冰川面积减少量占 1959/1961 年的 11.4%。其中 1959/1961 至 1992 年冰川面积减少了 8.6%,而在 1992—2001 年期间,冰川面积减少了 2.8%。从各支流域冰川变化情况来看,最近 40 多年来位于哈尔里克山南坡的克尔其马克和庙儿沟流域冰川面积减少剧烈,面积减少量分别占 1959/1961 年面积的 18.7% 和 15%,位于北坡的土尔干流域冰川变化幅度相对

较小,为 4.6%。研究区冰川面积从 1959/1961 到 1972 年减少了 7.45 km² (0.57 km²/a),1972—1992 年期间冰川面积缩小了 2.31 km² (0.11 km²/a),而在最近 9 年(1992—2001 年)面积缩小速度又有加剧趋势,面积减少了 3.21 km²,年变化率为 0.36 km²。从表 1 不难看出,20 世纪 50 年代末到 70 年代初,冰川退缩幅度大,冰川面积年减少率约为 0.51%,20 世纪 70 年代初到 90 年代初,退缩速度大幅减缓,冰川面积年减少率为 0.1%,90 年代以后退缩速度又有加剧趋势,冰川面积年减少率增加为 0.31%。该结果与刘潮海^[17]等对天山乌鲁木齐河源和北天山冰川变化分析得出的天山山区冰川变化趋势一致。

表 1 1959/1961—2001 哈尔里克山区各流域冰川面积变化规律

Tab. 1 Glacier area changes in the Karlik Mountain from 1959/1961 to 2001

编号	流域名称	各个时段冰川面积变化($\Delta S/\text{km}^2$; $S/\%$)							
		1959/1961—1972		1972—1992		1992—2001		1959/1961—2001	
		ΔS	S	ΔS	S	ΔS	S	ΔS	S
5Y711B	科托果勒	-1.53	6.5	-0.14	-1.8	-0.43	-2.8	-2.1	-8.9
5Y711C	吐尔干	-0.38	5—2.	-0.07	-0.5	-0.22	-1.5	-0.7	-4.6
5Y822A	板房沟	-0.66	6—4.	-0.45	-3.1	-0.53	-2.6	-1.7	-10.2
5Y822B	榆树沟	-0.86	5—3.	-0.51	-2.1	-1.09	-4.6	-2.5	-11.3
5Y822C	庙儿沟	-1.82	6—8.	-0.78	-3.8	-0.50	-2.4	-3.1	-15.0
5Y822D	克尔其马克	-2.20	8—14.0	-0.34	-2.2	-0.45	-2.8	-3.0	-18.7
平均		-7.45	6.5	-2.31	-2.0	-3.21	-2.8	-13.0	-11.4

从最近几年遥感监测结果来看,20 世纪 50 年代以来高亚洲山区冰川退缩显著,但是冰川退缩速率区域差异明显,青藏高原南部朋曲流域冰川面积自 20 世纪 70 年代到 2001 年减少了大约 9%^[18];长江源的格拉丹冬山区 1969—2002 年 33 年间,冰川面积缩小了 4.8%,其中 1992—2002 年退缩最大,冰川面积减少了 2.57%^[19];在东帕米尔高原 Saukdara 和 Zulumart 山区冰川 1992—2001 年面积减少了 11.6%,明显高于 1970—1992 年期间减少的 7.8%^[20];慕士塔格—公格尔山区冰川 1962—1999 年年减少率为 0.12%,1990—1999 年期间年减少率增大为 0.47%^[21];中亚天山山区, Akshirak 和 Ala Archash 山区从 1977—2003 年期间冰川面积减少分别为 8.7% 和 10.6%^[22];在吉尔吉斯斯坦共和国西

Terkey—Altatoo 山区冰川面积 1971—2002 年面积减少了 8%^[23];在中国境内,在天山中段 1963—2000 年冰川退缩了 13%,而且冰川在 1986—2000 年比 1963—1986 年退缩要大^[3];在 1963—1999/2000 年期间,天山南坡开都河流域,冰川萎缩了 11.6%,而阿克苏河域 247 条冰川中 126 条前进,冰川退缩较小,冰川面积减少仅为 3.3%^[24];天山北坡的喀什河和四棵树河流域 1962—1990 年冰川面积减少量占 1962 年冰川面积的 2.6% 和 3.5%^[17]。1962—1992 年的 30 年间,乌鲁木齐河源地区冰川面积平均缩小率为 13.8%^[4]。可见,20 世纪 90 年代初以来,冰川退缩加剧是比较普遍的现象,这与姚檀栋^[25]等的高亚洲冰川进入 20 世纪 90 年代后退缩急剧增加的结论一致。

表 2 1959/1961—2001 年哈尔里克山区各流域

冰川储量变化规律

Tab. 2 Volume changes of glaciers in the Karlik Mountain from 1959/1961 to 2001

编号	流域名称	冰川储量变率/%			
		$V_{1959/61-1972}$	$V_{1972-1992}$	$V_{1992-2001}$	$V_{1959/61-2001}$
5Y711B	科托果勒	-9.0	-0.9	-1.5	-11.4
5Y711C	吐尔干	-2.5	-0.5	-1.1	-4.1
5Y822A	板房沟	-3.1	-3.2	-4.0	-10.3
5Y822B	榆树沟	-2.0	-3.3	-5.0	-10.3
5Y822C	庙儿沟	-11.0	-4.4	-2.9	-18.3
5Y822D	克尔其马克	-14.1	-2.5	-2.8	-19.8
平均		-6.6	-2.6	-3.1	-12.3

新疆东部是我国极干旱的内陆区之一,哈尔里克山南坡的冰川储水量是哈密盆地地表径流的 8 倍,冰川融水是该区河川径流主要的补给来源,而且该地区一些重要的城镇都位于哈尔里克山冰川融水补给比例很大的河流上,伊吾河冰融水补给比例为 33.8%,下游是伊吾城;板房沟为 52.3%、八木墩为 41.3%,他们的下游是哈密^[10]。可见,冰川储量变化对该区水资源和城市经济发展的影响是深远的。因此,有必要对冰川储量变化进行分析,冰川储量是冰川平均厚度与其相应的冰川面积的乘积,冰川平均厚度根据如下经验公式^[10]计算

$$H = -11.3 + 53.21F^{0.3}, \quad (3)$$

式中: H 为冰川平均厚度 (m), F 为冰川面积 (km^2)。计算结果(表 2)表明:冰储量 1959/1961—1972 年减少了 $4.61 \times 10^8 \text{ m}^3$,减少率为 6.6%;1972—1992 年减少了 $1.78 \times 10^8 \text{ m}^3$,年损失约 $0.085 \times 10^8 \text{ m}^3$,1992—2001 年减少了 $2.14 \times 10^8 \text{ m}^3$,年损失 $0.214 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。冰川储量的变化与冰川面积变化趋势一致。

4 讨 论

冰川变化是气候变化的必然结果,在气象要素中气温和降水与冰川进退变化的关系最为密切,而夏季气温和年降水是冰川变化的两个主要的控制因素,夏季气温决定消融量,年降水影响积累率^[26-30]。从海拔 1 728.6 m 的伊吾气象站资料分析表明:夏季(6~9 月)平均气温 2001 年比 1959 年升高了

0.73 °C,从线性关系(图 3)来看,冬季(11~3 月)

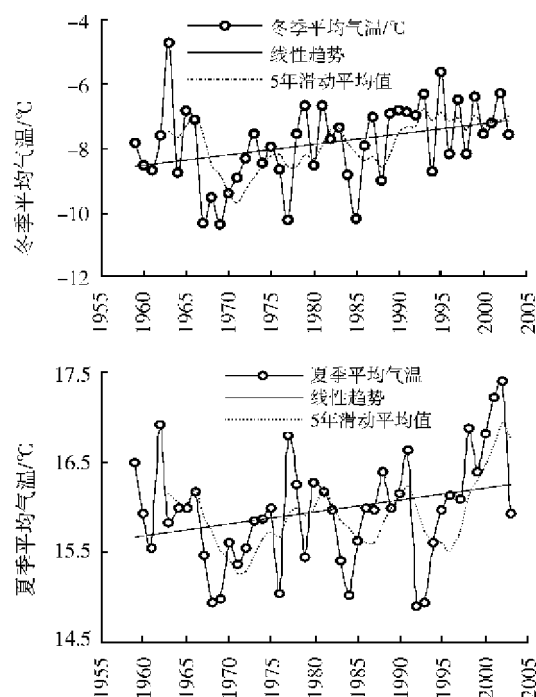


图 3 伊吾气象站 44 年来冬季(11~3 月)和夏季(6~9 月)平均气温变化

Fig. 3 Temperature changes in winter (November—March) and summer (June—September) at the Yiwu meteorological station in the past 44 years

和夏季(6~9 月)平均气温和年降水量都呈现明显的增加趋势,冬季气温升高使得冰川活动层升温开始时间提前,因而冰川表层温度接近于 0 °C 的时间及整个冰川活动层升温来得早并且持续的时间长,这一现象可使冰川表面消融期延长,且由于冰雪层温度高,因而在夏季气温不是太低的年份,融化相同数量的冰雪物质消耗的能量要少,冰面消融反而可能会有所增加^[31]。夏季气温升高明显会加剧冰川的消融。降水量变化的分析表明(图 4):自 1959 年以来,冬季、夏季和年降水量都呈现了增加趋势,而且夏季降水增加最显著,这与毛伟峰^[32]等研究的天山西段山区降水量变化趋势一致。降水量显著增加为冰川的积累创造了良好的条件,但是,对于以夏季为主要积累期的冰川,夏季气温显著升高会引起雪线持续升高,由于升温引起高海拔冰川区夏季液态降水增加而不是固态降水的增加,使得冰川物质平衡收入减小,但是支出还在增加,而冬季的积累不足

以弥补物质平衡亏损,使得冰川退缩加速^[33,34]。对于同样以夏季补给型的乌鲁木齐1号冰川物质平衡量变化研究表明:物质平衡量在1985年前与降水呈正相关,但是1985年后发生了变化,年降水和夏季降水都明显的增加而物质平衡亏损。尤其在1997—2002年气温和降水量处在高峰期,物质平衡却为有观测以来连续的强亏损时段,冰川退缩速度20世纪80年代末以来也明显增大,尤其以2000—2002年为甚,单纯用夏季冰川消融增强的理由难以解释冰川物质平衡的剧烈亏损^[35-37],那么很可能的另一个原因就是夏季气温的升高引起冰川区夏季液态降水的增加,使得物质输入量减少,但气温升高引起的物质输出量在增加,造成了物质平衡创纪录的亏损。

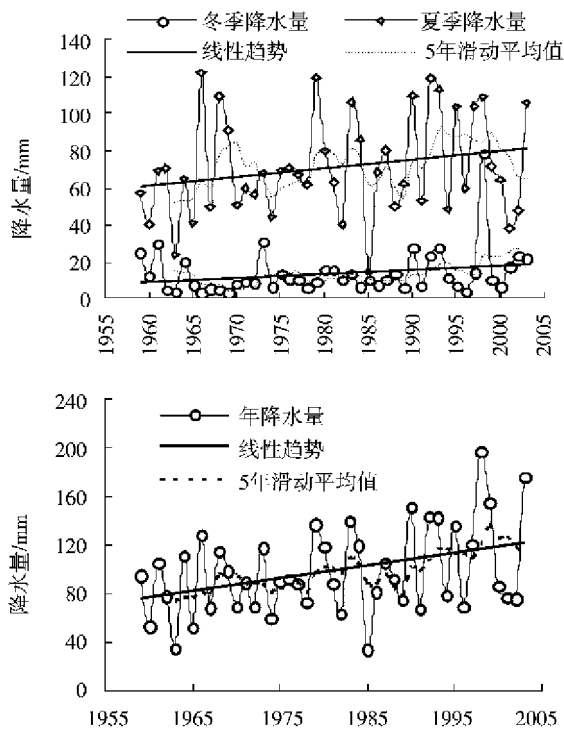


图4 伊吾气象站44年来冬季(11~3月)、夏季(6~9月)和年降水变化

Fig.4 Winter (November—March), summer (June—September) and annual precipitation changes at the Yiwu meteorological station in the past 44 years

冰川变化虽然滞后于温度变化,但是它们之间存在很好的对应关系^[38],尤其对于长度小于2 km的冰川,他们的变化与气候变化基本同步^[39],本研究区冰川规模小、长度短,其中长度小于2 km的冰

川占81%,因此可以认为该研究区冰川变化与气候变化基本同步。从图3和图4中我们不难看出1959—1966年是个相对暖干的时期,1959—1966年相对于1972—1992年夏季和冬季平均气温偏高分别为0.35℃和0.75℃,比平均气温(1959—2003年)偏高0.16℃和0.34℃,年降水量偏少了14.4%,这个时期气温相对较高,降水量相对较少,而使得冰川大幅度退缩。而1992—2001年夏季平均气温与1972—1992年相比升高了0.42℃,年降水量增加了16.7 mm,占前期降水量的16.7%,而且20世纪90年代中期以来的夏季升温幅度明显加大,这使得冰川消融加剧。此外,夏季升温幅度加大,很可能使得冰川区夏季液态降水增加而不是固态降水的增加,因此冰川物质平衡收入减小,物质平衡线升高,物质平衡亏损,冰川退缩加速;当然这还有待进一步深入的观测研究来证实。

5 结 论

通过对遥感数据分析表明,尽管新疆地区气候由暖干向暖湿转型,哈尔里克山区冰川仍呈退缩状态,1959/1961—2001年冰川面积和储量减少了11.4%和12.3%。20世纪50年代末到70年代初,冰川退缩幅度大,冰川面积和储量年减少率分别约为0.51%和0.508%,20世纪70年代初到90年代初,退缩速度大幅减缓,冰川面积和储量年减少率为1%和0.13%,90年代以后退缩速度又有加剧趋势,冰川面积和储量年减少率增加到0.31%和0.34%^[40]。

夏季气温和年降水是控制冰川变化的根本因素。1959—2003年期间,研究区冬、夏季气温和年降水都呈现了显著的增加趋势,但是气温的急剧升高是造成冰川退缩加剧的主要原因。1959/1961—1972年时段的冰川退缩率大,与1959—1966年时段气温偏高、而降水量偏少有直接的关系。20世纪90年代中期以来的夏季升温幅度明显加大,使得冰川消融加剧;尽管这个时期降水量也在增加,但是夏季升温幅度加大很可能使得冰川区液态降水增加而不是固态降水的增加,冰川物质平衡收入减小,物质平衡线升高,而引起冰川后退加速。总之,升温幅度的增大是影响20世纪90年代初以来冰川退缩加剧

的根本原因。

参考文献 (References)

- [1] Hu Ruji, Jiang Fengqing, Wang Yajun, Evaluation on the glacial water resources in Xinjiang, China [J]. *Arid Zone Research*, 2003, 20(3): 187—191. [胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊. 新疆雪冰水资源的环境评估[J]. 干旱区研究, 2003, 20(3): 187—191.]
- [2] Nemec J, Schaake J. Sensitivity of water resource systems to climatic variation [J]. *Hydrological Science*, 1982, 27: 327—343.
- [3] Li Baolin, Zhu Axing, Zhang Yichi, et al. Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan [J]. *Journal of Glaciology*, 2006, 52 (178): 425—432.
- [4] Chen Jianming, Liu Chaohai, Jin Mingxie. Application of the repeated aerial photogrammetry to monitoring glacier variation in the drainage area of the Urumqi River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(4): 331—336. [陈建明, 刘潮海, 金明贤. 重复航空摄影测量方法在乌鲁木齐河流域冰川变化监测中的应用[J]. 冰川冻土, 1996, 18(4): 331—336.]
- [5] Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng, et al. Cause of glacier changes in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology*, 2003, 49(167): 539—546.
- [6] Liu Shiyin, Shen Yongping, Sun Wenxin, et al. Glacier changes since the Little Ice Age maximum in the Western Qilian Mountains, Northwest China, and consequences of glacier runoff for water supply [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 233—243. [刘时银, 沈永平, 孙文新等. 祁连山西部小冰期以来的冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 233—243.]
- [7] Liu Shinyin, Ding Yongjiang, Shanguan Donghui, et al. Glacier retreat as a result of climate warming and increased precipitation in the Tarim River Basin, Northwest China [J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 43: 91—96.
- [8] IPCC 2001. Climate change 2001, the scientific basis [M]// Prather M, Ehhalt D. Climate and climate change chemistry. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 239—287.
- [9] Frank P, Andreas K, Maisch M, et al. The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory I, methods [J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 34: 355—361.
- [10] Wang Yinsheng, Liu Chaohai, Ding Liangfu, et al. Glacier inventory of China (III) Tianshan Mountains (interior drainage area of scattered flow in east) [M]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glacier and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 1986. [王银生, 刘潮海, 丁良福, 等. 中国冰川编目 III 天山山区 (东部散流内流区) [M]. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 北京: 科学出版社, 1986.]
- [11] Luo Guangxiao, Ai Li, Qi Xianming, et al. Hydrological characteristics of the Yushugou valley [J]. *Xinjiang Meteorology*, 2002, 25(5): 19—20. [骆光晓, 艾力, 祁先明, 等. 榆树沟流域水文特征[J]. 新疆气象, 2002, 25(5): 19—20.]
- [12] Luo Guangxiao, Liu li, Wu Liping. Analysis of the hydrologic properties of Yiwu River valley [J]. *Arid Land Geography*, 1999, 22(1): 47—52. [骆光晓, 刘莉, 吴力平. 伊吾河流域水文特性分析[J]. 干旱区地理, 1999, 22(1): 47—52.]
- [13] Zhang Minghua. Extracting the temperate glacier information in the mount Namjagbarwa Tibet autonomous Region, based on ETM+ Image [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(2): 226—232. [张明华. 基于 ETM+ 影像的西藏南迦巴瓦峰地区海洋性冰川信息提取[J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 226—232.]
- [14] Stokes C R, Popovnin V, Aleynikov A, et al. Recent glacier retreat in the Caucasus Mountains, Russia, and associated increase in supraglacial debris cover and supra-/proglacial lake development [J]. *Annals of Glaciology*, 2007, 46: 195—202.
- [15] Hall D K, Bayr K, Schfner W, et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from ground and space (1893—2001) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86: 566—577.
- [16] Silverio W, Jaquet M. Glacial cover mapping (1987—1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95: 342—350.
- [17] Liu Chaohai, Kang Ersi, Liu Shiyin, et al. A study of arid land glacier changes and its impact on the runoff in the northwest [J]. *Science of China D*, 1999, 29 (supplement 1): 55—62 [刘潮海, 康尔泗, 刘时银, 等. 西北干旱区冰川变化及其径流效应研究[J]. 中国科学 D, 1999, 29(增刊 1): 55—62.]
- [18] Jin Rui, Li Xin, Che Tao, et al. Glacier area changes in the Punqu River Basin, Tibetan Plateau between 1970s and 2001 [J]. *Journal of Glaciology*, 2005, 51(175): 607—610.
- [19] Ye Qinghua, Kang Shichang, Chen Feng, et al. Monitoring glacier variation on Geladandong mountain, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote sensing and GIS technologies [J]. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(179): 537—545.
- [20] Khromova T E, Osipova G B, Tsvetkov D G, et al. Changes in glacier extent in the eastern Pamir, Central Asia, determined from historical data and ASTER imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102: 24—32.
- [21] Shanguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Monitoring the glacier changes in the Muztag Ata and Konggur Mountains, east Pamirs, based on Chinese glacier inventory and

- recent satellite imagery[J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 43: 79—85.
- [22] Aizen V B, Kuzmichenok V A, Surazakov A B, et al. Glacier changes in the Tien Shan as determined from topographic and remotely sensed data[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 56: 328—340.
- [23] Narama C, Shimamura Y, Nakayama D, et al. Recent changes of glacier coverage in the western Terskey—Alatoo range, Kyrgyz Republic, using Corona and Landsat [J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 43: 223—229.
- [24] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Shangguan Donghui, et al. Glacier retreat as a result of climate warming and increased precipitation in the Tarim River Basin, northwest China[J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 43: 91—96.
- [25] Yao Tandong, Liu Shiyin, Pu Jianchen, et al. Recent glaciers retreating in High Asia and their impact on the water resources of Northwest China[J]. *Science in China D*, 2004, 34 (6): 535—543. [姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响[J]. *中国科学(D)地球科学*, 2004, 34 (6): 535—543.]
- [26] Liu Yan, Li Xiaolong, Hu Anyan. Response of runoff to precipitation changes—A Case of Weihe[J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(1): 49—52. [刘燕, 李小龙, 胡安焱. 河川径流对降水变化的响应研究—以渭河为例[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(1): 49—52.]
- [27] Yang Jinhu, Jiang Zhihong, Wei Feng, et al. Variability of extreme high temperature and low temperature and their response to regional warming in northwest China in recent 45 years[J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29(5): 625—631. [杨金虎, 江志红, 魏锋, 等. 中国西北近 45 年来极端高、低温的变化及对区域性增暖的响应[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(5): 625—631.]
- [28] Cui Yu, Yuan Yujian, Jin Hailong, et al. Reconstruction and analysis of 467-year spring precipitation series in the Urumqi River Head[J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(4): 496—500. [崔宇, 袁玉江, 金海龙, 等. 乌鲁木齐河源 467 年春季降水的重建与分析[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(4): 496—500.]
- [29] Han Jankang, Liu Yiexiang, Liu Yongjian. Summer temperature trend for one century around Taklimakan Desert reconstructed by the $\delta^{18}\text{O}$ records of Chongce Ice Core, West Kunlun Mts[J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(1): 89—93. [韩建康, 刘业祥, 刘永健. 塔克拉玛干沙漠周边地区上世纪前半叶夏季气温趋势变化[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(1): 89—93.]
- [30] Huo Wen, Ali Mamtimin, Liu Xinchun, et al. Correlation between years of warm winter and precipitation of spring and summer[J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(2): 257—261. [霍文, 艾力·买买提明, 刘新春, 等. 新疆南部地区暖冬年与春夏季降水的相关分析[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(2): 257—261.]
- [31] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Wang Ninglian, et al. Mass balance sensitivity to climate change of the glacier No. 1 at the Urumqi River head, Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(1): 9—13 [刘时银, 丁永建, 王宁练, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡对气候变化的敏感性研究[J]. *冰川冻土*, 1998, 20(1): 9—13.]
- [32] Mao Weiyi, Jiang Yuan'an, Li Jiangfeng. Analysis on the linear tendency of precipitation in North Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29(6): 797—802. [毛伟峰, 江远安, 李江凤. 新疆北部的降水量线性变化趋势特征分析[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(6): 797—802.]
- [33] Hasnain S I. Himalayan glaciers meltdown: impact on South Asian Rivers[J]. *IAHS Pub* 2002, 274: 1—7.
- [34] Kadota T, Seko K, Ageta Y. Shrinkage of glacier AX010 since 1978, Shorong Himal, east Nepal[C]// Young G J. *Snow and Glacier Hydrology (Proc. Kathmandu Symp. Nov. 1992)*. *IAHS Publ*, 1993, 218: 145—154.
- [35] Ju Yuanjiang, Wei Xia, Liu Gengnian. Statistics and analysis on the mass balance of glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River in the Tianshan Mountains[J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29(1): 79—80. [鞠远江, 魏遐, 刘耕年. 天山乌一号冰川物质平衡特征的统计分析[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(1): 79—80.]
- [36] Han Tianding, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. A characteristics of Glacier NO. 1 at the headwaters of the Urumqi River in the Tianshan Mountains[J]. *Advance in Earth Science*, 2005, 20(3): 298—303. [韩添丁, 刘时银, 丁永建, 焦克勤. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡特征[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 298—303.]
- [37] Li Zhongqin, Han Tianding, Jing Zhefan, et al. A summary of 40 year observed variation facts of climate and glacier No. 1 at headwater of Urumqi River, Tianshan, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 117—123. [李忠勤, 韩添丁, 井哲帆, 杨惠安, 焦克勤. 乌鲁木齐河源区气候变化和 1 号冰川 40 a 观测事实[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 117—123.]
- [38] Joe T K, Sandeep C R. An overview of glaciers, glacier retreat, and subsequent impacts in Nepal, India and China[J]. *WWF Nepal Program Report*, 2005: 1—70.
- [39] Su Zhen, Liu Zongxiang, Wang Wenti, et al. Glacier fluctuations responding to climate change and forecast of its tendency over the Qinghai—Tibet Plateau[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 16(2): 607—612. [苏珍, 刘宗香, 王文梯, 等. 青

- 藏高原冰川对气候变化的响应及趋势预测[J]. 地球科学进展, 1999, 16(2): 607—612.]
- [40] Ding Yongjian. Response of cryosphere to climate warming since 1980 over the northern hemisphere[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(2): 131—138. [丁永建. 1980 年以来冰冻圈对气候变暖响应的若干证据 [J]. 冰川冻土, 1996, 18(2): 131—138.]

Response of glacier variations in the eastern Tianshan Mountains to climate change, during the last 40 years

WANG Ye-tang, HOU Shu-gui, LU An-xin, LIU Ya-ping

(State Key Laboratory of Cryospheric Science, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Mountain glaciers are one of potential climate indicators because they are sensitive to climate changes. Glacier area and volume variations in the Karlik Mountain, the eastern Tianshan Mountains, from 1959/1961 to 2001 were analyzed in this paper. The topographic maps of 1:100 000 scales in 1959/1961, 1972 aerial photographs and satellite images (Landsat TM and ETM+) from 1992 and 2001 was used to map the surface area of glaciers and in this region through a process of manual digitizing on a false color composite of bands 5, 4, 3 (red, green, blue). Glacier volumes were calculated using the experience formula developed by Liu and others, based on the relation between glacier area and volume. The results indicate that the glacier area and volume over the Karlik Mountain shrunk by 11.4% and 12.3%, respectively, in the last 40 years. The rate of the glacier area decrease was $0.51\% \cdot a^{-1}$ over the interval 1959/1961–1972, and decreased to $0.1\% \cdot a^{-1}$ between 1972 and 1992, but increased by about three times ($0.31\% \cdot a^{-1}$) from 1992 to 2001, which indicated accelerated glacier retreat in recent decades. In the same way, the volume of the Karlik mountain glaciers was reduced with the rates of $0.508\% \cdot a^{-1}$ from 1959/1961 to 1972, $0.13\% \cdot a^{-1}$ during 1972–1992, and $0.34\% \cdot a^{-1}$ from 1992 to 2001, respectively. Glacier changes in the eastern Tianshan Mountains have a significant response to increasing summer temperatures. Analysis of the climate records of over the last 40 years from the Yiwu meteorological station also showed a precipitation rise in winter and summer from 1959, but these could not compensate for the mass loss due to ablation. The large shrinkage of Karlik mountain glaciers from 1959/1961 to 1972 can be attributed to the warm and dry climatic events during 1959–1966. The sharp increase in summer air temperature resulted in the accelerated glacier recession in this region since the 1990s.

Key Words: Karlik Mountain; Glacier variations; RS; GIS